

激光与光电子学进展

基于正交试验和响应面法的激光抛光参数优化

黄旭东, 王涛*, 胡少武, 姚涛, 苗润芃, 康清川, 张译之

河北工业大学机械工程学院, 天津 300401

摘要 在激光抛光金属材料时,材料表面的粗糙度是评判抛光效果的主要指标。采用正交试验及响应面法进行了激光抛光表面粗糙度试验设计。为了研究离焦量、激光功率、重复频率、扫描速度这四个因素对表面粗糙度的影响,设计了四因素三水平正交试验,对结果进行了极差分析和对比选优。之后利用响应面法设计了四因素三水平的 Box-Behnken Design(BBD)试验,建立了表面粗糙度的数值模型,同时得到了优化的抛光工艺参数。正交试验极差优化得到的最低粗糙度为 $0.1178\ \mu\text{m}$,略高于响应曲面优化得到的 $0.1112\ \mu\text{m}$ 。当离焦量为 $3\ \text{mm}$,激光功率为 $29.825\ \text{W}$,重复频率为 $91.451\ \text{kHz}$,扫描速度为 $1749.794\ \text{mm/s}$ 时,TC4合金经过激光微抛光后,表面粗糙度由 $0.3247\ \mu\text{m}$ 降低至 $0.1112\ \mu\text{m}$ 。合适的工艺参数有助于获得良好的激光抛光效果及较低的表面粗糙度。

关键词 激光光学; 激光抛光; 参数优化; 正交试验; 响应面法

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1114004

Parameter Optimization of Laser Polishing Based on Orthogonal Experiment and Response Surface Method

Huang Xudong, Wang Tao*, Hu Shaowu, Yao Tao, Miao Runpeng,
Kang Qingchuan, Zhang Yizhi

College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjing 300401, China

Abstract As for laser polishing of metal materials, the main criterion of laser polishing is surface roughness. In this paper, the orthogonal experiment and the response surface method are used to design an experiment of surface roughness after laser polishing in order to study the effects of defocusing distance, laser power, repetition frequency, and scanning speed on surface roughness. First, four factors and three levels of orthogonal experiments are designed, and the range analysis and comparison are used for searching the best result. Then, the response surface method is used to design a Box-Behnken Design (BBD) experiment with four factors and three levels. The numerical model of surface roughness is established and the optimized laser polishing process parameters are obtained. The minimum surface roughness is $0.1178\ \mu\text{m}$ using the range analysis of orthogonal experiment, slightly higher than the surface roughness of $0.1112\ \mu\text{m}$ using the response surface method. Finally, the best process parameters of laser polishing are listed: defocusing distance is $3\ \text{mm}$, laser power is $29.825\ \text{W}$, repetition frequency is $91.451\ \text{kHz}$, and scanning speed is $1749.794\ \text{mm/s}$. Under the best process parameters, the surface roughness of TC4 alloys after laser micro-polishing is reduced from $0.3247\ \mu\text{m}$ to $0.1112\ \mu\text{m}$. Good polishing quality and low surface roughness can be obtained by using suitable process parameters.

Key words laser optics; laser polishing; parameter optimization; orthogonal experiment; response surface method

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-04; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51775166)

通信作者: *wtao_1@163.com

1 引言

随着现代制造技术的发展,人们对材料表面的加工精度和加工水准有了更高的要求。一种新型抛光技术——激光抛光被越来越多地应用到各种材料表面上。激光抛光和计算机控制系统结合,可对许多复杂表面进行抛光处理。相较于传统的机械抛光、化学抛光、研磨抛光等,激光抛光的效率和效果都有巨大的提升,并且更加绿色环保,成了国内外研究的热点^[1-3]。

自 20 世纪 80 年代开始,国外学者就开始了激光抛光金属材料的研究。1986 年, Tuckerman 等^[4]利用脉冲激光抛光电路中的金、铝材料。在优化激光抛光工艺参数方面, Ramos 等^[5]通过调控 CO₂ 激光器的激光功率,选择合适功率抛光金属表面,粗糙度降低超过 60%。Trtica 等^[6]采用不同波长激光抛光钛合金,发现低波长激光抛光钛合金时,所需的能量密度更小。Jaritngam 等^[7]用纳秒脉冲激光抛光 Ti6Al4V 表面,发现低激光功率和高脉冲频率结合容易获得光滑表面,用较低扫描速度时表面容易出现微裂纹。Nüsser 等^[8]研究了连续激光中高斯分布和平顶分布对激光抛光的影响,发现在同等条件下,平顶分布的激光的抛光效果更好。在国内,陈继民等^[9]采取了正交试验来优化分析激光抛光 2316 工具钢的工艺参数,得出功率和扫描间隔对激光抛光效果的影响最大。狄洪亮等^[10]采用单因素试验和正交试验结合,对半导体激光抛光 1.2333 模具钢的各因素进行分析,对比了各因素对抛光的影响大小,得出了工艺参数最优解。那冉

等^[11]用单因素试验法分析了激光工作电压、脉宽、光斑形状等对抛光 38CrMoAl 的影响效果,选出了参数最优解。

国内激光抛光工艺参数的优化主要集中于对模具钢、工具钢的研究^[12-15],关于激光抛光 TC4 合金多个工艺参数组合的研究相对较少。大多试验研究注重于用单因素试验去依次分析单个工艺参数对抛光效果的影响,但单因素试验很容易出现单个因素下效果都是最优,组合后的工艺参数往往不是最优解的情况。因此,本文采用正交试验和响应面法,研究激光抛光工艺参数组合最佳的问题。正交试验根据正交性从全面试验中筛选出有代表性的点进行试验,减少了试验整体的工作量,可以高效地找出最佳工艺参数。响应面法针对一定范围内的复杂函数关系拟合出合理的多项式模型,同时在试验寻优过程中对各个试验水平进行连续分析。本文分别进行了正交试验和响应面法试验,对比了两者的最优结果,既快速搜寻到一定范围内的最佳组合工艺参数,也获得了良好的粗糙度函数模型。

2 试验准备

2.1 材料性质

材料选用 TC4 合金,此材料比强度高,有好的耐腐蚀性和耐热性,其化学成分如表 1 所示。试验中采用电火花线切割方法获得试验试件,初始尺寸为 100 mm×100 mm×3 mm。之后用不同的抛光工艺参数进行抛光,并从中筛选出抛光效果最好、粗糙度最低的工艺参数。

表 1 TC4 钛合金的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of TC4 titanium alloy

Composition	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Mass fraction / %	5.50-6.50	3.50-4.50	0-0.25	0-0.08	0-0.13	0-0.13	0-0.12	Bal.

2.2 试验设备

激光抛光系统包括脉冲光纤激光器,型号为 PFL-QI-30S/IR,波长为 1064 nm,最大输出功率为 30 W,最大峰值功率为 6.7 kW,功率可调范围为 1%~100%,脉冲宽度为 100~130 ns,频率可调范围为 20~200 kHz,具有体积小、重量轻、峰值功率强的特点。试验装置如图 1 所示。本次钛合金表面形貌检测设备用 Zeiss 公司生产的 Smart Zoom5 超景深数码显微镜,测量分辨率约为 1 μm,综合放大倍数为 34~1010,用于测量材料表面形貌和三维轮

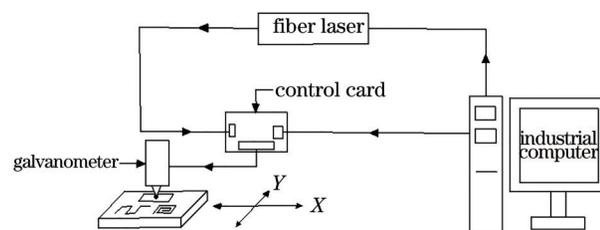


图 1 激光抛光装置示意图

Fig. 1 Schematic of laser polishing equipment

廓等,粗糙度检测设备使用东京精密公司生产的 SURFCOM NEX 探针式粗糙度仪。

2.3 试验原理及方法

将准备好的 TC4 合金水平放置在试验平台上,调整好振镜高度,对准 TC4 合金表面开始抛光,每次抛光区域大小为 5 mm×5 mm。激光抛光过的

TC4 合金板如图 2(a)所示,具体抛光后的表面如图 2(b)所示,抛光后的 TC4 合金区域相较于未抛光的区域,表面更加光滑,粗糙度降低。

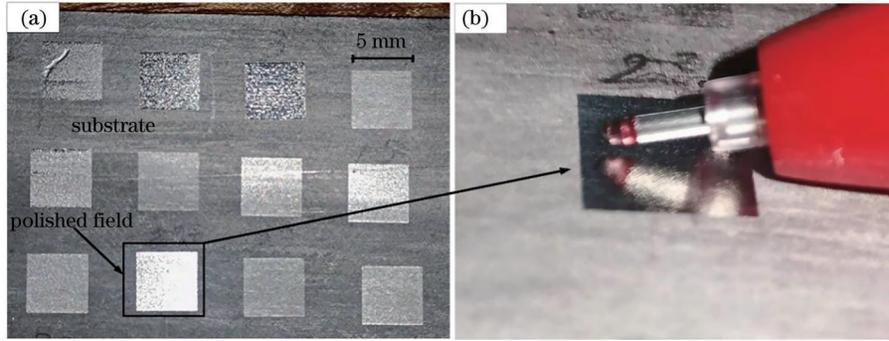


图 2 激光抛光后的 TC4 合金。(a) 基体表面和抛光后的区域;(b) 激光抛光后的表面

Fig. 2 TC4 alloy after laser polishing. (a) Substrate surface and polished field; (b) surface after laser polishing

激光抛光的扫描路径是“之”字形,具体路径及抛光作用原理如图 3 所示。在激光作用下,表面材料受热发生熔融流动,材料液化后受表面温度梯度的影响及张力作用的推动,高处的材料熔化向下流动以填补低凹处,而熔池本身的重力会阻碍材料的流动,最终达到表面平坦的效果。测量抛光区域的粗糙度时,在同一区域的不同方向分别测量两次取平均值;测量试验样品的初始表面粗糙度时,在材料基体表面任意选取三个区域,分别测量两次,取其平均值,测得粗糙度为 0.3247 μm。在激光抛光过程中,离焦量的变化会直接影响激光光斑大小,进而影响激光的能量密度。激光的能量密度决定了单个激光脉冲能量的熔化效果和熔融深度,光斑重叠率决定了熔融的范围以及热应力的叠加效果。这三个方面影响了激光抛光的最终效果。其中,脉冲激光的能量密度由功率和频率来表示^[16]:

$$E = \frac{4P}{f\pi d^2}, \quad (1)$$

式中: E 是激光的能量密度; P 是功率; f 是频率; d 是光斑直径。光斑重叠率是指激光光斑之间的重叠程度。光斑重叠率分为横向光斑重叠率和纵向光斑重叠率,为了保证抛光区域的均匀性,同时避免热应力的重复叠加,需要保持横向光斑重叠率和纵向光斑重叠率相等,横向光斑重叠率由扫描速度和频率共同决定,纵向光斑重叠率由扫描间隔决定^[17],具体公式为

$$\phi_x = 1 - \frac{v}{f \times d}, \quad (2)$$

$$\phi_y = \frac{d - \Delta}{d}, \quad (3)$$

式中: ϕ_x 是横向重叠率; ϕ_y 是纵向重叠率; v 是扫描速度; Δ 是扫描间隔。

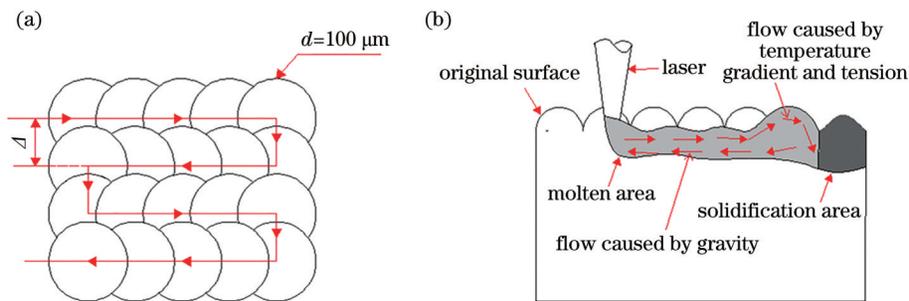


图 3 激光抛光原理示意图。(a) 激光抛光路径;(b) 激光抛光机理图

Fig. 3 Schematic of laser polishing. (a) Trajectory of laser polishing; (b) mechanism diagram of laser polishing

由式(1)~(3)可知,能量密度和光斑重叠率主要由激光功率、扫描速度、重复频率决定。因此,激

光抛光总影响因素有 4 个,即离焦量(h)、激光功率(P)、扫描速度(v)、重复频率(f),激光抛光影响因素

示意图如图 4 所示。之后利用这 4 个参数设计正交试验,得出优化结果,进一步分析极差得到最优解。再用响应面法设计试验,得到因素之间的交互作用

及方差,建立对应的激光抛光后粗糙度的二次函数模型,找出范围内的最优解,最终比较得出最优工艺参数组合。

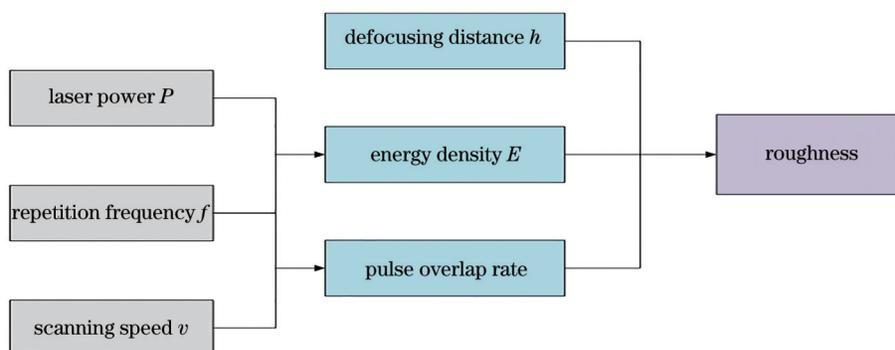


图 4 激光抛光影响因素示意图

Fig. 4 Schematic of factors influencing laser polishing

3 正交试验设计与分析

3.1 正交试验设计及结果

经过一系列单因素的试验分析,得到了离焦量、功率、频率、扫描速度的合适范围,但单因素试验具有局限性,无法进一步分析各个因素之间的交互作用,所以采用正交试验法来对激光抛光试验效果进行进一步优化^[18]。各组因素的水平值如表 2 所示,每个因素分别对应三个水平,有一水平、二水平、三水平。根据正交试验表一共进行 9 组试验,使

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Level table of orthogonal experimental factors

Variable	Low	Medium	High
Defocusing distance /mm	3	4	5
Laser power /W	20	25	30
Laser repetition frequency /kHz	70	90	110
Laser scanning speed / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	1650	1700	1750

用 Minitab 软件进行试验设计,每组抛光区域大小为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 。测量每个区域的粗糙度时,沿两个互相垂直的方向,测量两次取其平均值,得到的结果如表 3 所示。

从表 3 中可知,3-1 号样品的粗糙度值最低,7-1 号样品的粗糙度值最高。利用超景深数码显微镜观察抛光前的原始表面与抛光后的 3-1 号样品、9-1 号样品、7-1 号样品的微观形貌,结果如图 5 所示。可以看出,原始表面的山峰状形貌众多,沟壑纵横,起伏较大;7-1 号样品表面的山峰状形貌高度降低,上下限差距减小,但仍有一定数目的山峰;较 7-1 号样品,9-1 号样品的山峰进一步熔化,熔融效果明显,但仍存在不少起伏;较原始表面,3-1 号样品的变化最明显,表面山峰基本平整,大部分被熔融,仅边缘部分存在少量凸起,表面大部分区域趋于平坦,抛光效果最好。

9 组抛光表面与原始未抛光表面的粗糙度对比

表 3 正交试验的设计矩阵及结果

Table 3 Design matrix of orthogonal experiment and results

Sample No.	h/mm	P/W	f/kHz	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Roughness / μm		Average roughness / μm
					First	Second	
1-1	3	20	70	1650	0.1868	0.1774	0.1821
2-1	3	25	90	1700	0.1526	0.1640	0.1583
3-1	3	30	110	1750	0.1148	0.1369	0.1259
4-1	4	20	90	1750	0.2291	0.2187	0.2239
5-1	4	25	110	1650	0.2329	0.2481	0.2405
6-1	4	30	70	1700	0.1931	0.1783	0.1857
7-1	5	20	110	1700	0.2775	0.2893	0.2834
8-1	5	25	70	1750	0.1988	0.2376	0.2182
9-1	5	30	90	1650	0.2022	0.1952	0.1987

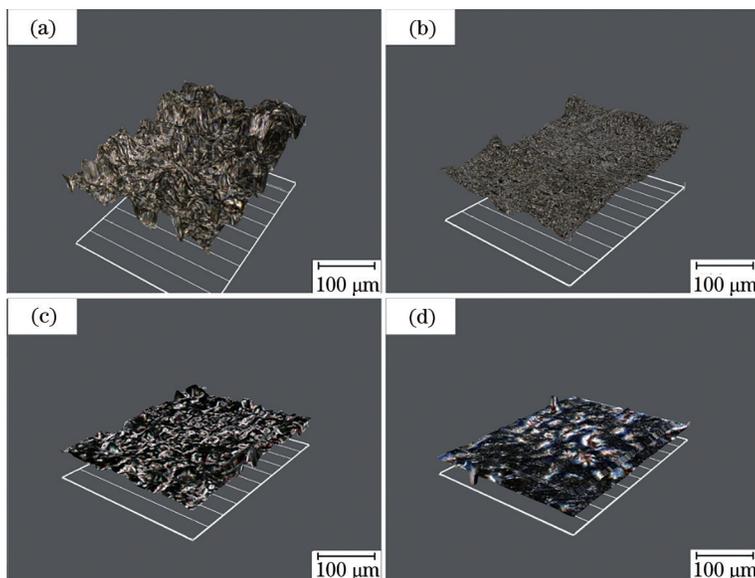


图 5 表面微观形貌。(a)原始表面;(b)7-1号样品;(c)9-1号样品;(d)3-1号样品

Fig. 5 Surface microscopic morphologies. (a) Original surface; (b) No. 7-1 sample; (c) No. 9-1 sample; (d) No. 3-1 sample

柱状图如图 6 所示,粗糙度保留两位小数,其中变化最大的是 3-1 号样品,粗糙度降低超过 60%,7-1 号样品的变化幅度最小,粗糙度仅降低了约 13%,9-1 号样品的粗糙度降低了约 40%。

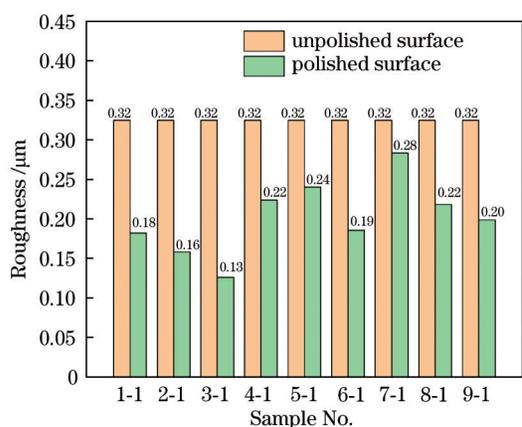


图 6 激光抛光前后的粗糙度变化

Fig. 6 Roughness changes before and after laser polishing

3.2 试验极差分析

表 4 为极差分析结果,其中 K_1, K_2, K_3 分别为各因素在一、二、三水平下的试验结果均值, R 值反映

表 4 极差分析结果

Table 4 Range analysis results

Parameter	h/mm	P/W	f/kHz	$v/(mm \cdot s^{-1})$
K_1	0.1554	0.2298	0.1953	0.2071
K_2	0.2167	0.2057	0.1936	0.2091
K_3	0.2334	0.1701	0.2166	0.1893
R	0.078	0.0597	0.023	0.0198

了该列因素的水平波动情况, R 值越大, 表明该因素对试验目标值的影响越大。

如表 4 所示, R 值从大到小的因素依次为离焦量、激光功率、重复频率和扫描速度, 表明这 4 个工艺参数对激光抛光效果的影响程度依次减小。离焦量的变化会影响熔池的直径大小, 进而影响热耦合区域大小。激光功率和重复频率决定了激光的能量密度, 而激光功率决定了单次激光脉冲作用下材料表面所接收的能量, 重复频率则决定了单位时间内输出激光的脉冲个数。扫描速度决定了激光在材料表面的作用时间, 扫描速度和重复频率决定了光斑重叠率, 光斑的重叠率决定了同一区域内的热影响大小。为了更直观地描述各个因素的极差对激光抛光效果的影响, 图 7 给出了极差的效应图。

从图 7 中可得优化水平组合为离焦量 $h=3\text{ mm}$, 激光功率 $P=30\text{ W}$, 频率 $f=90\text{ kHz}$, 扫描速度 $v=1750\text{ mm/s}$, 经过试验得到粗糙度 $R_a=0.1178\text{ }\mu\text{m}$, 粗糙度低于试验中的最优解。用超景深数码显微镜分别拍摄未抛光表面和用极差优化后的抛光表面的微观区域, 之后用得到的三维坐标数据绘制出的表面微观形貌如图 8(a)、(b) 所示。可以明显看到, 相较于原始表面, 抛光后的表面的立柱起伏减少了很多, 中间大部分区域趋于平坦。再从 Z 轴负方向去观察 XY 表面的形貌, 如图 8(c)、(d) 所示, 原始表面的高低起伏明显, 而抛光后的表面发生熔融流动, 高度差整体变小, 说明抛光后的表面形貌基本平整, 达到了降低粗糙度的效果。

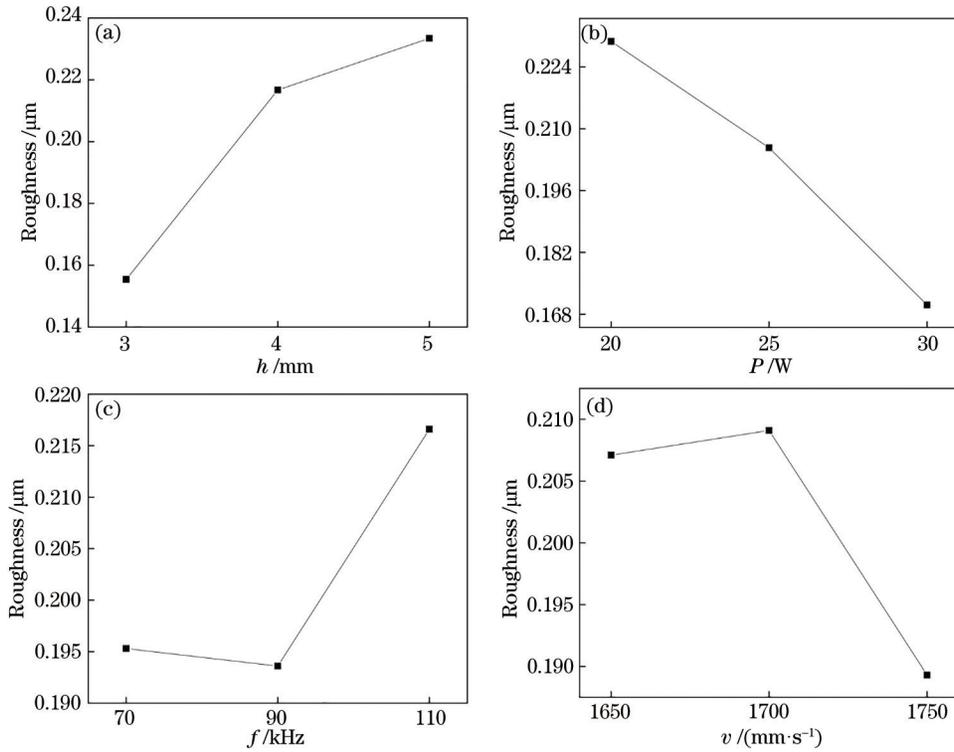


图7 极差效应图。(a)离焦量的极差变化图;(b)激光功率的极差变化图;(c)重复频率的极差变化图;(d)扫描速度的极差变化图

Fig. 7 Range effect diagrams. (a) Range variation diagram of defocusing distance; (b) range variation diagram of laser power; (c) range variation diagram of repetition frequency; (d) range variation diagram of scanning speed

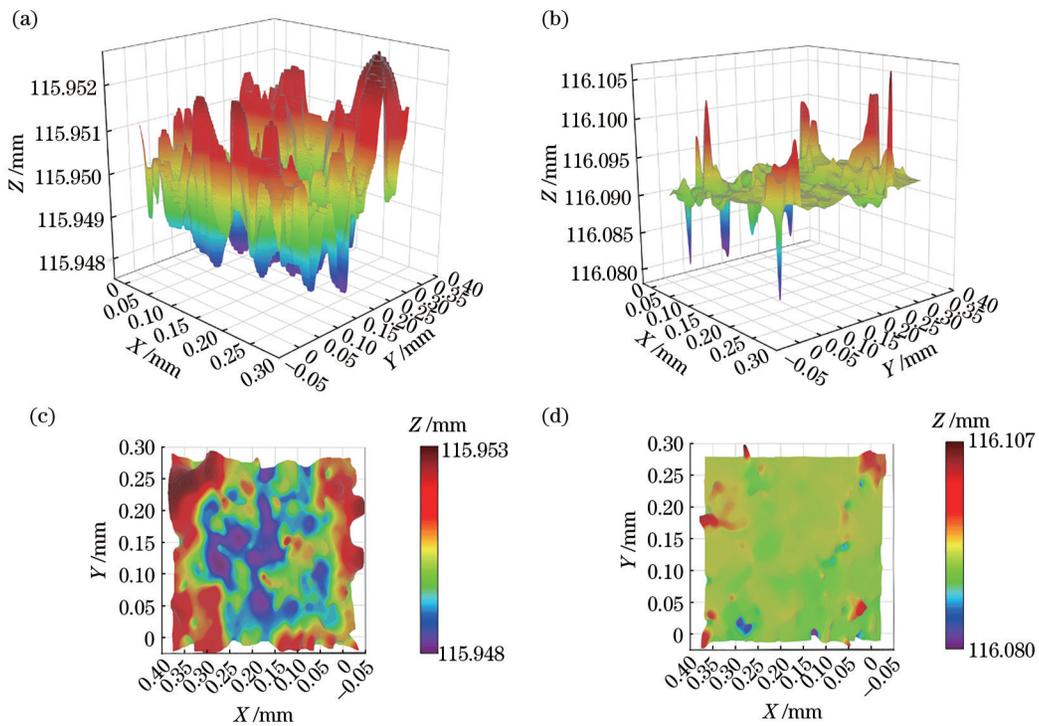


图8 激光抛光表面的三维形貌图。(a)原始表面;(b)最优参数下抛光的表面;(c)未抛光的XY表面;(d)最优参数下抛光的XY表面

Fig. 8 3D surface topographies of laser polishing. (a) Original surface; (b) surface after polishing with optimal parameters; (c) XY surface without polishing; (d) XY surface after polishing with optimal parameters

4 响应面法激光抛光试验

4.1 试验方法

响应面法(RSM)是一种基于数学和试验数据的统计学分析方法^[19-20],一般用来解决多变量的优化问题,主要任务是使响应值达到最优解,并建立各试验因子与响应值对应的回归方程。本次响应曲面试验设计是基于四因素三水平的 Box-Behnken Design(BBD)试验方案,利用软件 Design-Expert 10 的响应曲面模块设计试验,共设计出 29 组试验,具体试验参数和数据如表 5 所示。

表 5 BBD 试验参数及结果

Table 5 BBD experimental parameters and results

Sample No.	h/mm	P/W	f/kHz	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$R_a/\mu\text{m}$
1	5	25	90	1750	0.2340
2	4	25	90	1700	0.1842
3	4	25	90	1700	0.1968
4	4	20	90	1650	0.1790
5	5	25	90	1650	0.2301
6	5	25	110	1700	0.2565
7	4	20	110	1700	0.2611
8	5	30	90	1700	0.2098
9	3	30	90	1700	0.1115
10	4	25	70	1650	0.1688
11	4	20	90	1750	0.2340
12	4	30	90	1750	0.1546
13	3	25	110	1700	0.1799
14	4	25	110	1650	0.2440
15	4	30	70	1700	0.1818
16	4	30	110	1700	0.1878
17	4	30	90	1650	0.1784
18	3	25	90	1750	0.1756
19	4	20	70	1700	0.2012
20	5	20	90	1700	0.2732
21	3	25	70	1700	0.1381
22	4	25	90	1700	0.1932
23	4	25	90	1700	0.2009
24	4	25	70	1750	0.1982
25	5	25	70	1700	0.2298
26	4	25	110	1750	0.2189
27	3	25	90	1650	0.1422
28	3	20	90	1700	0.1820
29	4	25	90	1700	0.1955

在上述响应曲面试验中,粗糙度最大的样品是 20 号样品,具体如图 9(a)所示,材料表面初步发生微熔,表面整体山峰状形貌只是略微降低,起伏仍然存在,整体形貌变化较小。粗糙度最小的 9 号样品如图 9(b)所示,表面经过激光烧蚀,大部分区域的山峰状形貌被打平,少部分区域仍有较低的山峰状形貌,表面整体变得平坦。

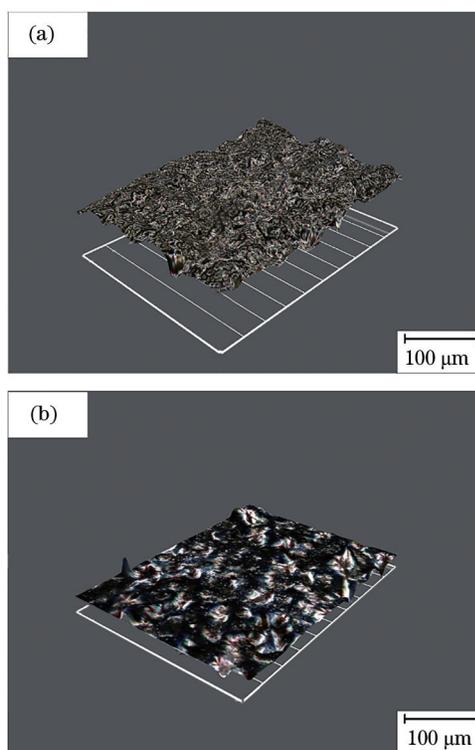


图 9 表面微观形貌。(a)20号样品;(b)9号样品

Fig. 9 Surface microscopic morphologies. (a) No. 20 sample; (b) No. 9 sample

4.2 激光抛光表面粗糙度预测模型建立

以粗糙度 R_a 为响应值,使用方差分析法(ANOVA)对试验数据进行分析,基于 BBD 试验的数据进行拟合建模,具体结果如表 6 所示,其中 A、B、C、D 分别为离焦量、激光功率、重复频率和扫描速度 4 个因素在分析法中的符号, F_{value} 为 F 分布检验统计量值, P_{value} 为模型可靠性统计检验值, R^2 为模型决定系数, R_{ADJ}^2 为校正决定系数, R_{PRED}^2 为预测决定系数。

由表 6 可知,离焦量、激光功率、重复频率的 $P_{\text{value}} < 0.0001$,扫描速度的 $P_{\text{value}} < 0.05$,所以离焦量、激光功率和重复频率对抛光表面粗糙度的影响极为显著,而扫描速度对抛光表面粗糙度的影响较为显著。最后根据均方值的大小比较,可以得知对激光抛光表面粗糙度的影响排序(从大到小)为 A、B、C、D。在二次项里,影响较为显著的是 C^2 。交互

表 6 表面粗糙度模型的方差分析
Table 6 Variance analysis of surface roughness model

Source	Sum of squares	Mean square	F_{value}	P_{value}	Reliability
Model	0.038	0.004758	56.4	< 0.0001	Significant
A	0.021	0.021	251.14	< 0.0001	
B	0.007831	0.007831	92.83	< 0.0001	
C	0.004419	0.004419	52.39	< 0.0001	
D	0.00044	0.00044	5.22	0.0335	
BC	0.000725	0.000725	8.59	0.0083	
BD	0.001551	0.001551	18.38	0.0004	
CD	0.0007437	0.0007437	8.82	0.0076	
C ²	0.001167	0.001167	13.83	0.0014	
Residual	0.001687	0.00008436			
Lack of fit value	0.001532	0.00009578	2.48	0.1969	Not significant
Pure error	0.0001547	0.00003868			
Total	0.04				

$R^2=0.9576$ $R^2_{Adj}=0.9406$ $R^2_{Pred}=0.9002$

项 BC、BD、CD 的影响较为显著,其余不显著。失拟项的 P_{value} 为 0.1969 ($P_{value} > 0.05$),说明建立的模型可以较好表达激光各个工艺参数对激光抛光 TC4 合金的影响。本次响应面试验的模型决定系数 R^2 的值为 0.9576,最终得到的二次多项式回归模型方程为

$$R_a = -5.61552 + 0.042017h + 0.1409P + 0.021710f + 3.31725 \times 10^{-3}v - 1.34625 \times 10^{-4}Pf - 7.876 \times 10^{-5}Pv - 1.3635 \times 10^{-5}fv + 3.21952 \times 10^{-5}f^2 \quad (4)$$

图 10 给出了表面粗糙度的实际值与预测值的对比拟合图,可以看出预测值与实际值非常接近,模型的预测值基本在实际值周围均匀分布。决定系数 R^2 为 0.9576,与 1 非常接近,说明建立的拟合

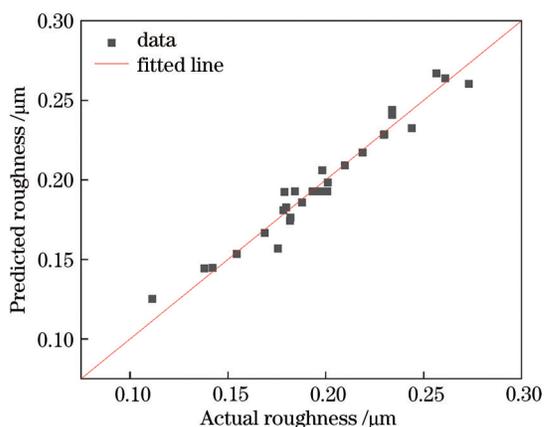


图 10 模型实际值与预测值的对比

Fig. 10 Comparison between actual and predicted values

模型精度高,符合预期的效果。

在 Design-Expert 软件中,将离焦量、激光功率、重复频率、扫描速度都设定在原有的参数范围内,以粗糙度最低为优化目标,最终得到优化结果为离焦量 $h=3$ mm,激光功率 $P=29.825$ W,重复频率 $f=91.451$ kHz,扫描速度 $v=1749.794$ mm/s,经过实际测量得粗糙度 $R_a=0.1112$ μm,略低于试验中 9 号样品的最低值。

4.3 激光抛光表面粗糙度 RSM 模型的参数交互性分析

基于二次多项式回归方程及方差分析绘制的三维曲面图如图 11 所示。从图 11(a)中可以看出,当激光功率为 30 W、重复频率为 75~105 kHz 时,粗糙度整体较低,此时根据式(1)可知能量密度大小为 3.5~5 J/cm²,说明在这个能量密度范围内适合抛光;而当激光功率减小而重复频率增大时,粗糙度的降低效果最差,因为能量密度太小。从图 11(b)中可以看出,当激光功率过高时,需要配合大的扫描速度,以避免较高的激光功率对材料表面的过度熔化。从图 11(c)中可以看出,当重复频率为 70~78 kHz、扫描速度为 1650~1660 mm/s 时,粗糙度降低最多,此时根据式(2)可知光斑重叠率为 76%~81%;而当重复频率增大而扫描速度仍然较小时,粗糙度增大,因为此时光斑重叠率过高,材料部分区域被多次加工,热影响加剧,粗糙度增大。

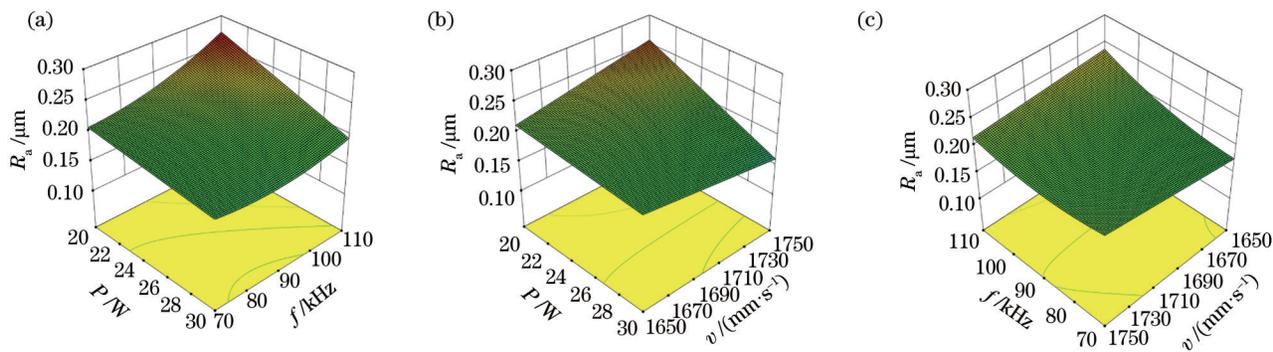


图 11 显著交互项对表面粗糙度的影响。(a)激光功率与重复频率的影响;(b)激光功率与扫描速度的影响;(c)重复频率和扫描速度的影响

Fig. 11 Effects of significant interaction terms on surface roughness. (a) Effects of laser power and repetition frequency; (b) effects of laser power and scanning speed; (c) effects of repetition frequency and scanning speed

5 优化结果的对比选取

对正交试验的结果进行极差优化,得到的最优工艺参数组合为离焦量 $h=3$ mm,激光功率 $P=30$ W,重复频率 $f=90$ kHz,扫描速度 $v=1750$ mm/s,经过式(1)、(2)计算,得到的能量密度为 4.24 J/cm²,光斑重叠率为 80.56% ,粗糙度值 $R_a=0.1178$ μm。经过 RSM 优化后的最佳工艺参数组合为离焦量 $h=3$ mm,激光功率 $P=29.825$ W,重复频率 $f=91.451$ kHz,扫描速度 $v=1749.794$ mm/s,经过式(1)、(2)计算,得到的能量密度为 4.15 J/cm²,光斑重叠率为 80.85% ,粗糙度值 $R_a=0.1112$ μm。因此,可以看出,经过 RSM 优化后的激光抛光工艺参数略胜一筹,可以得到更低的粗糙度。

6 结 论

脉冲光纤激光抛光 TC4 合金时,得到的优化的工艺参数为 3 mm 离焦量、 29.825 W 激光功率、 91.451 kHz 重复频率、 1749.794 mm/s 扫描速度,对应的激光能量密度为 4.15 J/cm²,光斑重叠率为 80.85% ,在此参数下,可将 TC4 合金的粗糙度从 0.3247 μm 降低至 0.1112 μm,粗糙度下降 60% 以上。

激光功率需要和扫描速度相匹配,实现优化组合,使熔化表面产生的毛细力和马兰戈尼效应产生的热毛细力推动表面的山峰填补表面的凹谷,达到熔峰填谷,降低表面粗糙度的效果。因此,较大的激光功率需要配合较高的扫描速度,避免过高的功率过度熔化材料表面;较低的功率配合较低的扫描速度,避免功率过低,表面毛细力、热毛细力不够,

无法使材料表面熔融,表面粗糙度下降不显著。

在本次试验环境中,影响激光抛光效果的因素的重要性按大小依次排序为离焦量、激光功率、重复频率、扫描速度。离焦量会直接影响激光抛光的热耦合区域大小,进而影响材料表面受热形成的熔池半径大小。离焦量过大导致熔池半径偏大,进而表面整体受热不均匀,产生过多的热影响;离焦量过小导致表面整体无法发生熔融,粗糙度变化不显著。激光功率和重复频率共同决定了激光能量密度,过大的能量密度会导致表面过度受热,凹谷处的深度进一步加深,过小的能量密度则无法使材料达到熔点,熔化不充分,降低抛光效果。扫描速度决定了激光的作用时间,合适的扫描速度才会使表面受热均匀,不会发生表面过熔融现象,保持表面浅熔融状态,达到较好的抛光效果。

参 考 文 献

- [1] Ma C P, Guan Y C, Zhou W. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 171-177.
- [2] 周泳全, 张卫, 肖海兵, 等. 连续激光高速抛光冷作模具钢的表面粗糙度及性能[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 347-353.
Zhou Y Q, Zhang W, Xiao H B, et al. Roughness and property of CW laser high speed polishing of die steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 347-353.
- [3] 王涛, 王杰, 姚涛, 等. 激光抛光中金属表面的建模及仿真[J]. 激光与红外, 2019, 49(9): 1068-1074.
Wang T, Wang J, Yao T, et al. Modeling and simulation of metal surface in laser polishing[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(9): 1068-1074.
- [4] Tuckerman D B, Weisberg A H. Planarization of

- gold and aluminum thin films using a pulsed laser[J]. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7(1): 1-4.
- [5] Ramos J A, Murphy J, Wood K, et al. Surface roughness enhancement of indirect-SLS metal parts by laser surface polishing[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/76144/2001-04-Ramos.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [6] Trtica M, Gakovic B, Batani D, et al. Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd: YAG laser operating at 1064 nm and 532 nm [J]. Applied Surface Science, 2006, 253(5): 2551-2556.
- [7] Jaritngam P, Tangwarodomnukun V, Qi H, et al. Surface and subsurface characteristics of laser polished Ti₆Al₄V titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106102.
- [8] Nüsser C, Wehrmann I, Willenborg E. Influence of intensity distribution and pulse duration on laser micro polishing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 462-471.
- [9] 陈继民, 仇毅. 激光抛光模具钢参数优化[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1841-1845.
Chen J M, Qiu Y. Optimizing parameters of laser polishing mould steel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1841-1845.
- [10] 狄洪亮, 张心明. 半导体激光器抛光 1.2333 模具钢工艺参数优化研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(2): 37-41.
Di H L, Zhang X M. Optimization of process parameters of 1.2333 die steel polished by semiconductor lasers[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(2): 37-41.
- [11] 那冉, 陈涛. 38CrMoAl 表面 YAG 激光抛光技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011402.
Na R, Chen T. Research of YAG laser polishing of 38CrMoAl surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011402.
- [12] 张伟康, 戴伟, 郑志镇, 等. 激光抛光 H13 模具钢自由表面演变的数值模拟与验证[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702002.
Zhang W K, Dai W, Zheng Z Z, et al. Numerical simulation and verification of free-surface evolution in laser polishing of H13 tool steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702002.
- [13] 张伟康. 模具钢激光抛光过程的数值模拟与缺陷机理分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Zhang W K. Numerical simulation and defect mechanism analysis of die steel laser polishing process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [14] 孙志强. 模具表面短脉冲激光抛光理论及仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Sun Z Q. Research on theory and simulation of short-pulse laser polishing on mold surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [15] 周浩, 赵振宇, 周后明, 等. 钢材料表面的激光抛光技术及应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(23): 184-189.
Zhou H, Zhao Z Y, Zhou H M, et al. Laser polishing technology on steel surface and its application[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(23): 184-189.
- [16] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502002.
Gao L Y, Zhou J Z, Sun Q, et al. Numerical simulation and surface morphology of laser-cleaned aluminum alloy paint layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502002.
- [17] 刘帅. 纳秒脉冲激光除锈机理与工艺实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Liu S. Study on mechanism and process of nanosecond pulse laser derusting[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [18] 仇毅. 光纤激光抛光模具钢研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
Qiu Y. Investigations on fiber laser polishing die steel [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [19] 朱明, 周建忠, 孟宪凯, 等. 基于响应面的 Q345C 钢锈层激光清洗工艺参数优化[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 381-391.
Zhu M, Zhou J Z, Meng X K, et al. Optimization of laser cleaning process parameters for Q345C steel rust layer based on response surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 381-391.
- [20] 庞祎帆, 傅戈雁, 王明雨, 等. 基于响应面法和遗传神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602112.
Pang Y F, Fu G Y, Wang M Y, et al. Parameter optimization of high deposition rate laser cladding based on the response surface method and genetic neural network model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602112.